

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองสำหรับการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติพร้อมกับการจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลรวมไปถึงการจำลองผลกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นประกอบกับวิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกชนิดวงแหวนแบนในแบบโหมคการสันตามแนวรัศมี เพื่อคาดเดาช่วงความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกและเพื่อที่จะนำผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลรวมไปถึงกำลังงานสูญเสียทางกลที่ได้จากการจำลองนั้นนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ อีกต่อไป การจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในแบบ 3 มิติและโปรแกรมสำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ใช้โปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเองพร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมความถี่ธรรมชาติให้เป็นที่น่าเชื่อถือ ซึ่งในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติพร้อมกับจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลประกอบกับการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกลและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เน้นศึกษาที่ค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดรวมไปถึงการจำลองผลของกำลังงานสูญเสียทางกลพร้อมกับคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 นั้นซึ่งถือเป็นรากฐานที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และเพื่อพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย โดยในบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอปริทัศน์วรรณกรรม พร้อมทั้งศึกษาถึงทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาและคำนวณถึงความถี่ธรรมชาติเพื่อทำนายช่วงการทำงานและแสดงผลศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลอย่างละเอียดและชัดเจนมาก่อน และสำหรับในบทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก วงจรบัลลาสต์ไฟโอโซอิล็กทริก รวมถึงวิธีการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการ

การจัดเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้ถูกนำมาใช้เป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 นั้นจะเป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์และขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการจัดเชิงกลซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองและอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแบบ 3 มิติโดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษคกต่างของกาลเลอร์กิน ซึ่งสำหรับการคำนวณนั้นจะคำนวณครอบคลุมตลอดทั่วทั้งปริมาตรของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการดำเนินงานในบทที่ 5 นั้นจะอธิบายถึงทฤษฎีของความถี่ธรรมชาติในแบบต่าง ๆ พร้อมแสดงตัวอย่างของความถี่ธรรมชาติที่อยู่รอบ ๆ ตัวในชีวิตประจำวันประกอบกับอธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั่นสะเทือนเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์โดยการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะใช้วิธีค่าเจาะจงเนื่องจากแบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาตินั้นเป็นรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สามารถใช้ร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ พร้อมกับแสดงผลความถี่ธรรมชาติรวมไปถึงแสดงผลค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ได้จากการทดลองจริงและได้ทำการเปรียบเทียบผลของความถี่ธรรมชาติจากการทดลองจริงกับผลของความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นเอง ซึ่งผลความถี่ธรรมชาติที่ได้ออกมาเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างยิ่งโดยผลลัพธ์ของความถี่ธรรมชาติที่ได้มีความคล้อยคลึงและสอดคล้องกันโดยมีความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันไม่เกิน 5% ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 6 นั้นเป็นการอธิบายถึงโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณพร้อมกับจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการจัดเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติประกอบกับเสนอผลการจำลองการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ในแบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้าและการจัดที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น โดยสำหรับกระบวนการสร้างกริดในแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่าโปรแกรม Solid works ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างรูปแบบที่เป็น 3 มิติ รวมไปถึงได้คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกลพร้อมกับจำลองผลการกระจายกำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ในแบบ 3 มิติประกอบการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะส่งผลให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณข้อต่อเล็กโทรดขาออกและเกิดกระบวนการจัดเชิงกลรวมไปถึงเกิดกำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์มีค่ามากที่สุด โดยจะเกิดอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 84.13 kHz และจะเกิดประสิทธิภาพสูงถึง 94% เมื่อมีค่าโหลดเท่ากับ 5.8 k Ω

7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

1. พัฒนาโปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อมจำลองผลรูปร่างลักษณะการกระจายของความร้อน โดยจะพิจารณาถึงผลกระทบของความร้อนที่ส่งผลต่อค่าคงที่วัสดุและคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก รวมไปถึงการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความร้อนที่เกิดขึ้นกับค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลเพื่อที่นำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ต่อไปได้

2. ออกแบบหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น เพิ่มจำนวนชั้นของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกเป็น 2 ชั้น 3 ชั้นหรือหลาย ๆ ชั้นและทำการปรับเปลี่ยนหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกให้เป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น แบบสี่เหลี่ยม แบบหกเหลี่ยมหรือแบบแปดเหลี่ยม เป็นต้น เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณลักษณะต่าง ๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนชั้นหรือรูปทรงของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกไป เพื่อสามารถนำเลือกไปใช้กับงานต่าง ๆ ได้เหมาะสม



รายการอ้างอิง

- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2542). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์คุุณบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มณฑกานต์ พิรศักดิ์โสภณ. (2553). บัลลาสต์ไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 วัตต์ ชนิด T8. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มนทล นาวงษ์. (2546). การศึกษาเปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซฟอร์เมอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ชิ่ง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุทัศน์ อ่วมจันทร์., และ สุพากรณ์ อิกฐุสกุล. (2544) เปียโซอิเล็กทรอนิกส์ทรานซฟอร์เมอร์. ปรินญา นีพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อานนท์ อิศรมงคลรักษ์. (2552). การออกแบบอุปกรณ์กำลังสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานได้สายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ando, E.I., and Kagawa, Y. (1992). Finite-element simulation of transient heat response in ultrasonic transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 39 (3): 432-440.
- Antonova, E.E., and Silvester, P.P. (1997). Finite element for piezoelectric vibrations with open electric boundaries. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 44 (3): 548-556.
- Bai, Z., Zhao, Y., Ma, W., and Hao, T. (2008). Modal analysis for small satellite system with Finite element method. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 50 (2): 788-792.

- Bhuyan, S., and Hu, Junhui. (2008). Wireless drive of a piezoelectric plate by dipole antenna. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (6): 1199-1202.
- Buchanan, G. R., and Peddieson, J., (1989). Axsymmetric vibration of infinite piezoelectric cylinders using one-dimensional finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 36 (4): 459-465.
- Dalessandro, L., and Rosato, D. (2005). Finite element analysis of the frequency response of a metallic cantilever coupled with a piezoelectric transducer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (5): 1881-1890.
- Eric, M.B., Weixing, H., Dan, Y.C., and Fred, C.L., 2005, Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent Lamp ballast applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 20(5): 1213-1220.
- Friedrich, W., Lerch, R., Prestele, K., and Soldner, R., (1990). Simulation of piezoelectric lamb wave delay lines using a finite element method. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 37 (2): 248-254.
- Henderson, I. R. (2002). Piezoelectric ceramics: principles and applications. APC International Ltd. American Piezo Ceramics Inc & APC Products, Inc.
- Ho, S-T. (2007). Modeling and analysis on ring-type piezoelectric transformers. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (11): 2376-2384.
- Huebner, K. H., Dewhirst, D. L., Smith, D. E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineers** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Jin, Y., Foo, C.F., and Zhu, W.G. (1999). Three-dimensional simulation of piezoelectric transformer for the switching power supply. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (1): 295-299.
- Joo, H-W., Lee, C-H., and Jung, H-K. (2001). Analysis of piezoelectric transformer by using finite-element method and equivalent-circuit considering load variation. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 56 (1): 459-462.
- Joo, H-W., Lee, C-H., Rho, J-S., and Jung, H-K. (2006). Analysis of temperature rise for piezoelectric transformer using finite-element method. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 53 (8): 1449-1457.

- Joo, H-W., Lee, C-H., Rho, J-S., and Jung, H-K. (2003). Identification of material constants for piezoelectric transformers by three-dimensional, finite-element method and a design-sensitivity. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 50 (8): 965-971.
- Kim, B. T., Kwon, B. I., and Park, S. C. (1999). Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35 (5): 3742-3744.
- Kwok, K.F., Dong, P., Cheng, K.W.E., Kwok, K.W., Ho, Y.L., Wang, X.X., and Chan, H. (2002). General study on piezoelectric transformer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (8): 216-220.
- Lerch, R. (1990). Simulation of piezoelectric devices by two and three dimension finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 37 (2): 233-247.
- Lee, C-H., Joo, H-W., Rho, J-S, Cho H-S., and Jung H-K., (2002). Inversion of piezoelectric material coefficients by using finite element method with asymptotic waveform evaluation. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 56 (4): 661-664.
- Li, H.L., Hu, J.H., and Chan, H.L.W. (2004). Finite element analysis on piezoelectric ring transformer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 51 (10): 1247-1254.
- Lin, R. L., Lee, F. C., Baker, E. M., and Chen, D. Y. (2000). Inductor-less piezoelectric transformer ballast for linear fluorescent lamps. **Proceeding on CPES Power Electronics System**. 309-314.
- Loveday, P.W. (2007). Analysis of piezoelectric ultrasonic transducers attached to waveguides using waveguide finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (10): 2045-2051.
- Loveday, P.W. (2008). Simulation of piezoelectric excitation of guided waves using waveguide finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (9): 2038-2045.
- Preston, T. W., Reece, A. B. J., and Sangha, P. S. (1988). Induction motor analysis by time-stepping techniques. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24 (1): 471-474.
- Rho, J-S., Joo, H-W., Lee, C-H., and Jung, H-K. (2002). Analysis of ultrasonic linear motor by using finite element method and equivalent circuit. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 52 (4): 649-652.

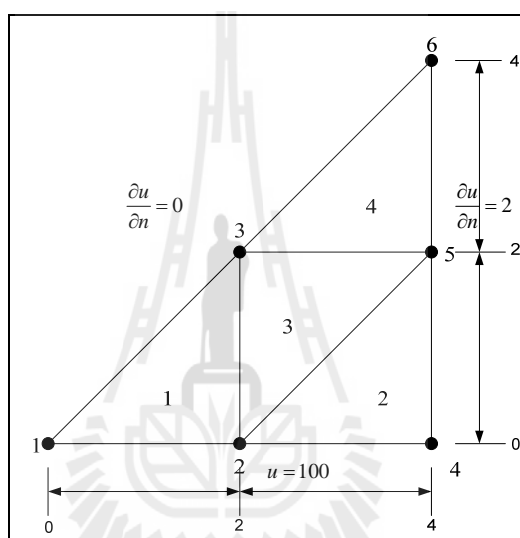
- Safari, A., and Akdogan, E. K. (2008). Piezoelectric and acoustic materials for transducer application. USA: Springer.
- Sung, J.C., Kyu, C.L., and Bo, H.C., 2005, Design of fluorescent lamp ballast with PFC using a power Piezoelectric., **IEEE Transaction on Industrial Electronics**. 52(6): 1573-1581.
- Tsuchiya, T., Kagawa, Y., Wakatsuki, N., and Okamura H. (2001). Finite element simulation of piezoelectric transformers. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 48 (4): 872-878.
- Uchino, K., and Hirose, S. (2001). Loss mechanisms in piezoelectric how to measure different losses separately. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 48 (1): 307-321.
- Wang, Y.C., He, J.J., Liu, Y.P., Wu, J., and Lee, C.K. (2005). Theory and experiment of high voltage step-up ratio disk type piezoelectric transformer for LCD-TV. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (8): 284-287.
- Wang, J., Yong, Y-K., and Imai, T. (1997). Finite element analysis of the piezoelectric vibrations of quartz plate resonators with higher-order plate theory. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (3): 650-658.
- Wang, J.S., and Ostergaard, D.F. (1999). A finite element-electric circuit coupled simulation method for piezoelectric tranducer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 59 (9): 1105-1108.
- Yong, Y-K., and Cho, Y. (1994). Algorithms for eigenvalue problems in piezoelectric finite element analyses. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (5): 1057-1062.
- Yong, Y-K., and Zhen, Z. (1993). A perturbation method for finite element modeling of piezoelectric vibrations in quartz plate resonators. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 40 (5): 551-562.



ภาคผนวก ก

การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต

การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตเป็นส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งในขั้นตอนการจำลองผล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยการประยุกต์ใช้เงื่อนไขค่าขอบเขตมีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์ (Neumann) และการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล (Dirichlet) โดยในงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิลและจะทำการยกตัวอย่างระบบขนาดเล็กเพื่อให้เห็นภาพการประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตทั้ง 2 แบบ โดยสามารถแสดงกริดของปัญหารวมทั้งการระบุขอบเขตของปัญหาทั้งแบบนอยมันน์และดิริเคิล ได้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ตัวอย่างปัญหาสำหรับประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต

กำหนดให้เมตริกซ์ $[K_{sys}]$ ของสมการเชิงเส้นระบบรวม $[K_{sys}]\{u\} = \{f_{sys}\}$ เป็นดังสมการที่ (ก.1)

$$[K_{sys}] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 3 & 6 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 3 & 6 & 5 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (ก.1)$$

กำหนดให้โพลเดเวกเตอร์แต่ละอิลิเมนต์เมื่ออิลิเมนต์นั้นไม่มีขอบใดเป็นขอบเขตของปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (ก.2) และเมื่ออิลิเมนต์นั้นมีขอบเป็นขอบเขตของปัญหาแสดงได้ดังสมการที่ (ก.3)

$$\{f^{(e)}\} = \frac{Q\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.2})$$

$$\{f^{(e)}\} = \frac{Qh_{mn}d\Delta_e}{3} \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix} \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่ Q คือ ค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งในที่นี้สมมติให้มีค่าเท่ากับ 1
 h_{mn} คือ ระยะห่างระหว่างจุดต่อ m และ n
 d คือ ค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์
 Δ_e คือ พื้นที่ประจำอิลิเมนต์
 i, j, k คือ ค่าประจำจุดต่อของแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อจุดต่อ่นั้นเป็นจุดต่อที่ติดกับขอบแบบนอยมันน์ที่พิจารณาและมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่ติดกับขอบนอยมันน์

เนื่องจากการกำหนดเงื่อนไขแบบนอยมันน์จะมีความสัมพันธ์กับโพลเดเวกเตอร์แต่ละอิลิเมนต์โดยตรง ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดเงื่อนไขแบบนอยมันน์ในแต่ละอิลิเมนต์ก่อนที่จะทำการสร้างสมการโพลเดเวกเตอร์ระบบรวมแล้วจึงกำหนดเงื่อนไขแบบดิริเคิลเพื่อทำการแก้ระบบสมการเชิงเส้นต่อไป

ก.1 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์

การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์จะกระทำกับอิลิเมนต์ที่อยู่บริเวณขอบของเงื่อนไขซึ่งจากรูปที่ ก.1 ประกอบกับจากสมการที่ (ก.2) และ (ก.3) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์สามารถเขียนเป็นสมการโพลเดเวกเตอร์แต่ละอิลิเมนต์ได้ดังนี้ (เมื่อสมมติให้ $Q = 1$)

$$\{f^{(1)}\} = \frac{(2\sqrt{2})(0)(2)}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(2)}\} = \frac{(2)(2)(2)}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.67 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(3)}\} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.67 \\ 0.67 \\ 0.67 \end{bmatrix}$$

$$\{f^{(4)}\} = \frac{(2)(2)(2)}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{(2\sqrt{2})(0)(2)}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2.67 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

จากโหนดเวกเตอร์แต่ละอิลิเมนต์ที่สามารถเขียนเป็นโหนดเวกเตอร์ระบบรวมได้ดังนี้

$$\{f_{\text{sys}}\} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.67 \\ 0.67 \\ 2.67 \\ 6.01 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะได้สมการระบบรวมสำหรับปัญหาในรูปที่ ก.1 ดังสมการที่ (ก.4)

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 3 & 4 & 6 \\ 6 & 5 & 3 & 2 & 1 & 4 \\ 4 & 2 & 3 & 6 & 5 & 1 \\ 2 & 3 & 4 & 1 & 6 & 5 \\ 3 & 6 & 5 & 2 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.67 \\ 0.67 \\ 2.67 \\ 6.01 \\ 2.67 \end{bmatrix}$$

(ก.4)

ก.2 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล

หลังจากได้สมการระบบรวมดังสมการที่ (ก.4) แล้ว จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิล โดยจากรูปที่ ก.1 ทราบค่าคำตอบที่จุดต่อ 1, 2 และ 4 มีค่าเป็น 100 ดังนั้น เมื่อทำการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคิลจึงได้ดังสมการที่ (ก.5)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 0 & 6 & 5 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 0.67 - 6(100) - 5(100) - 2(100) \\ 100 \\ 6.01 - 2(100) - 3(100) - 1(100) \\ 2.67 - 3(100) - 6(100) - 2(100) \end{bmatrix} \quad (\text{ก.5})$$

จากสมการที่ (ก.5) สามารถนำไปแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาผลเฉลยได้ในขั้นตอนถัดไป



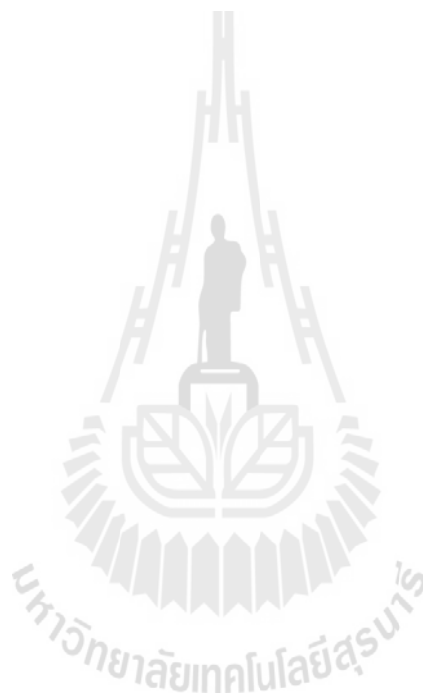


ภาคผนวก ข

การเผยแพร่ผลงานในขณะศึกษา

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

Vacharakup, S., Peerasaksopho, M., Kulworawanichpong, T., and Pao-la-or, P. (2011). Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method. **Applied Mechanics and Material Vols. 110-116. Switzerland.:** 61-66.



Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method

Somsak Vacharakup¹, Monthakarn Peerasaksophol²,
 Thanatchai Kulworawanichpong³ and Padej Pao-la-or⁴. *

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology
 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

¹wo_ant@hotmail.com, ²tweety-bow@hotmail.com, ³thanatch@sut.ac.th, ⁴padej@sut.ac.th

*Corresponding Author

Keywords: Piezoelectric transformer, 3-D Finite element method (3-D FEM), Electro-mechanical coupling, Natural frequency, Mechanical vibration

Abstract. Piezoelectric transformers are electronic devices made from piezoelectric materials. The piezoelectric transformers as the name implied are used for changing voltage signals from one level to another. Electrical energy carried with signals is transferred by means of mechanical vibration. Characterizing in both electrical and mechanical properties leads to extensively use and efficiency enhancement of piezoelectric transformers in various applications. In this paper, study and analysis of electrical and mechanical properties in forms of potential and displacement distribution throughout the volume, respectively, are discussed and especially focused on around its natural frequency. This paper proposes a set of quasi-static mathematical model of electro-mechanical coupling for piezoelectric transformer by using a set of partial differential equations. Computer-based simulation utilizing the three-dimensional finite element method (3-D FEM) is exploited as a tool for calculation in two purposes. The first use is developed the 3-D FEM for identifying its natural frequencies while the second use is for visualizing potentials and displacements distribution within the piezoelectric transformer. The computer simulation based on the use of the FEM has been developed in MATLAB programming environment. In addition, which satisfactory results of natural frequencies are compared with those obtained from the experiment and the accuracy of 3-D FEM model is confirmed.

Introduction

Piezoelectric transformers are electronic devices made from piezoelectric material such as BaTiO₃, PZT, PbN₂O₆, PT, PLZT and PMN. In this paper, radial mode vibration [1] of a circular ring or shortly called the ring-dot type where its applications in ballast electronic has been increasingly found is selected for study. Finite Element Method (FEM) is one among popular numerical methods that is able to handle problem complexity in various forms. At present, the FEM has been widely applied in most engineering fields. Even for problems of potentials and displacements distribution, the FEM is able to estimate solutions of partial differential equations governing the piezoelectric transformer. Study and analysis of electrical and mechanical properties in forms of potential and displacement distribution throughout the volume, respectively, are discussed and especially focused on around its natural frequency in this paper. Computer-based simulation utilizing the three-dimensional finite element method (3-D FEM) in a set of quasi-static mathematical model of electro-mechanical coupling for piezoelectric transformer, instructed in MATLAB programming environment with graphical representation for potentials and displacements distribution have been evaluated.

Modeling of Electro-Mechanical Coupling for a Piezoelectric Transformer

This paper uses PZT-840 powder to form circular ring piezoelectric transformers for test as described in Fig. 1. A schematic diagram of the experiment circuit in Fig. 2 consists of i) bridge rectifier ii) boost regulator and iii) half-bridge inverter to drive a 36-W fluorescent lamp.

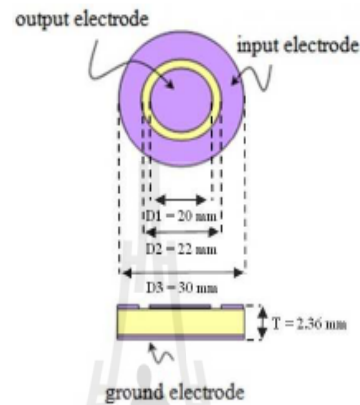


Fig. 1 Detail of the piezoelectric transformer with dimension

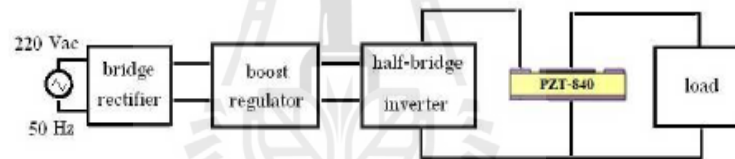


Fig. 2 Schematic diagram of the experiment circuit

Piezoelectric transformer can be described by using mathematical models to exhibit electro-mechanical coupling among stress tensor (\mathbf{T}), strain tensor (\mathbf{S}), electric field (\mathbf{E}), and electric displacement (\mathbf{D}) as in Eq. 1 and Eq. 2 [2,3].

$$\mathbf{T} = c^E \mathbf{S} - e^T \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = e \mathbf{S} + \epsilon^S \mathbf{E} \quad (2)$$

where c^E is the elastic stiffness tensor at constant electric field, ϵ^S is the dielectric permittivity tensor at constant strain, and e is piezoelectric stress tensor.

$$\nabla \cdot \mathbf{T} = \rho \ddot{u} \quad \text{with} \quad \mathbf{S} = B u \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad \text{with} \quad \mathbf{E} = -\nabla \Phi \quad (4)$$

And Eq. 3 and Eq. 4 are momentum balance and electric balance equations, respectively, in which ρ , B , u , and Φ are mass density, first spatial derivatives of the interpolation, mechanical displacement, and electric potential, respectively. This paper has considered the time-harmonic system, therefore $\ddot{u} = -\omega^2 u$, where ω is the angular frequency.

As described, a set of quasi-static mathematical model of electro-mechanical coupling for piezoelectric transformer by using a set of partial differential equations is collected as in Eq. 5 and Eq. 6.

$$c^E (\nabla \cdot B u) + \rho \omega^2 u + e^T (\nabla \cdot \nabla \Phi) = 0 \quad (5)$$

$$e(\nabla \cdot Bu) - \varepsilon^S (\nabla \cdot \nabla \Phi) = 0 \quad (6)$$

As can be seen, to obtain an exact solution is difficult. In this paper, the 3-D FEM has been employed to find an approximate solution.

3-D FEM for the Piezoelectric Transformer

The FEM is able to estimate solutions of partial differential equations governing the piezoelectric transformer. The domain of study with the 3-D FEM can be discretized by using linear tetrahedron elements. This can be accomplished by using Solidworks for 3-D grid generation. Fig. 3 displays grid representation of the piezoelectric transformer. The region domain consists of 11607 nodes and 55406 elements. An equation governing each element is derived from the electro-mechanical coupling equations directly by using Galerkin approach, which is the particular weighted residual method for which the weighting functions are the same as the shape. Finally, a set of linear equations in the compact matrix form is obtained:

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2[M] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^T & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

where the matrices $[M]$, $[K_{uu}]$, $[K_{u\phi}]$ and $[K_{\phi\phi}]$ are the mass, stiffness, piezoelectric coupling, and dielectric matrices, respectively.

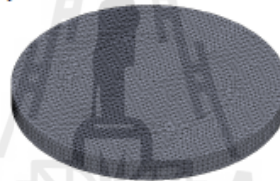


Fig. 3 Discretization of the piezoelectric transformer

The boundary conditions applied here are that to set zero potential at the ground electrode and 50 V at the input electrode. This simulation uses the system frequency of 50 Hz. The piezoelectric material properties shown by [4]:

$$e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.7 & 0 & 0 \\ -5.2 & -5.2 & 15.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (C/m}^2\text{)} \quad \varepsilon^S = \begin{bmatrix} 13.05 & 0 & 0 \\ 0 & 13.05 & 0 \\ 0 & 0 & 11.51 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ (F/m}^2\text{)}$$

$$c^E = \begin{bmatrix} 13.9 & 7.78 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.9 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.56 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.06 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)} \quad \rho = 7600 \text{ kg/m}^3$$

Eigenvalue Problem in Piezoelectric Finite Element Analysis

The solution of the motion equation for natural frequencies requires a special reduced form. If there is no damping and no applied force, the equation in matrix form reduces to [5]

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (8)$$

where $[M]$ is the mass matrix and $[K]$ is the stiffness matrix.

This is the motion equation for undamped free vibration. To solve Eq. 8, assume a harmonic solution of the form $\{u\} = \{\phi\} \sin \omega t$, where $\{\phi\}$ is the eigenvector or mode shape and ω is the angular natural frequency. If differentiation of the assumed harmonic solution is performed and substituted into the motion equation, the following is obtained

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (9)$$

By applying FEM, the matrices $[K]$ and $[M]$ in Eq. 9 are the matrices $[K_m]$ and $[M]$ in Eq. 7, respectively. An eigenvalue problem is a specific equation form that has many applications in linear matrix algebra, which ω^2 is the eigenvalues. The general mathematical eigenvalue problem of solving the equation of the form

$$\det([K_m] - \omega^2[M]) = 0 \quad (10)$$

Each eigenvalue defines a free vibration mode of the structure. The i -th eigenvalue is related to the i -th natural frequency as follows:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (11)$$

where f_i is the i -th natural frequency of a piezoelectric transformer.

Results and Discussion

The FEM-based simulation conducted in this paper is coded with MATLAB programming for calculation of natural frequency including electric potentials and mechanical displacements of piezoelectric transformer. Which satisfactory results of natural frequencies are compared with those obtained from the experiment. As described in Fig. 2, the operation frequency of the test circuit can be varied from 0-100 kHz in order to find the natural frequencies by considering the peak voltage gain of the piezoelectric transformers. This can be reported as five natural frequencies are located as marked in Fig. 4. By using the FEM, the calculated natural frequencies can be found and therefore compared with those obtained by the experiment as shown in Table 1. The calculated natural frequencies match very well with the experimental natural frequencies. The discrepancy of the results is less than 5%.

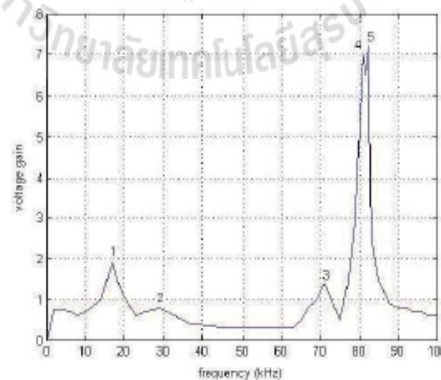


Fig. 4 Experimental result of natural frequencies of the piezoelectric transformer

Table 1 Comparison of natural frequencies of the piezoelectric transformer

Vibration modes	Natural frequencies (kHz)		
	Experiment	FEM	Difference (%)
1	17.75	-	-
2	29.13	30.54	4.84
3	71.08	70.48	0.84
4	81.12	83.44	2.86
5	82.29	85.57	3.99

For which 3-D FEM result, it can be graphically presented in the filled polygon of potentials and displacements dispersed thoroughly the volume of piezoelectric transformer. Fig. 5 illustrates the result of potential distribution of 3-D FEM in between 82-86 kHz where the voltage gain of the piezoelectric transformer is high. As seen in the figure, at 84 kHz the output voltage can reach as high as 450 V, about 9 times with respect to the input voltage of 50 V. Also, at the resonant frequency of 84 kHz the displacement distribution is patterned, uniform and heavily vibrated as shown in Fig. 6.

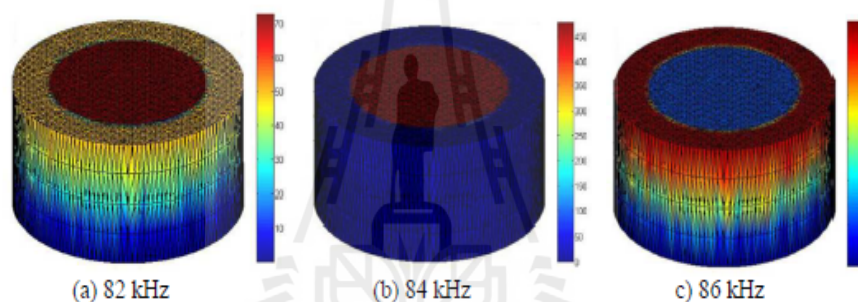


Fig. 5 Potentials distribution (V) within a piezoelectric transformer

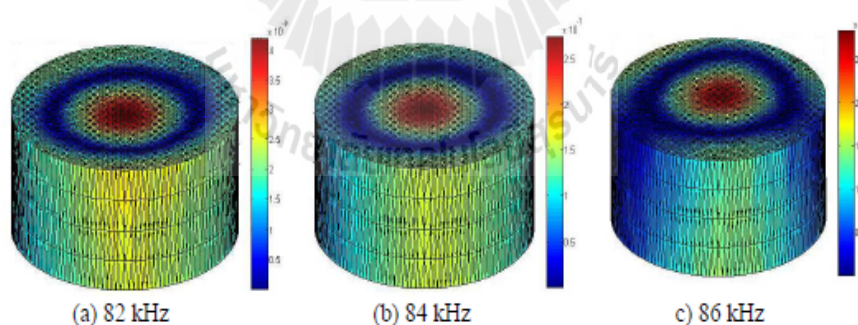


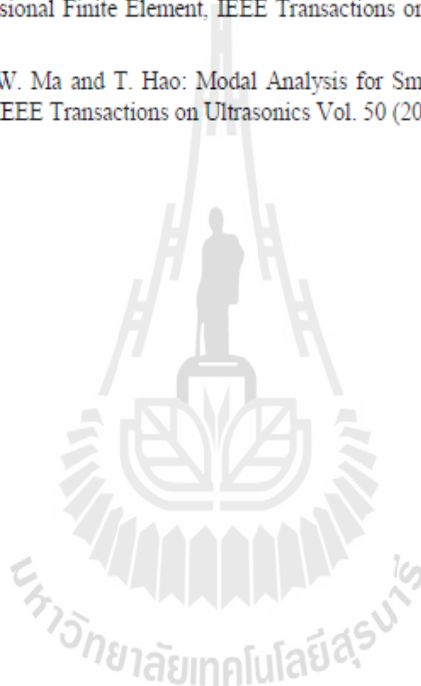
Fig. 6 Displacements distribution (m) within a piezoelectric transformer

Summary

This paper presents FEM based simulation for calculation of natural frequencies and visualization of potential and displacement distribution of the piezoelectric transformers. The test piezoelectric transformer is a circular ring type made from PZT-840. The computer simulation is performed by using 3-D finite element method (3-D FEM) instructed in MATLAB programming codes. As a result, the FEM accurately predicts the natural frequencies of the piezoelectric transformer. The discrepancy of the natural frequencies from FEM and the experimental result is less than 5%. In addition, at the resonant frequency, heavily mechanical vibration and highly voltage gain can be experienced.

References

- [1] K.F. Kwok, P. Dong, K.W.E. Cheng, K.W. Kwok, Y.L. Ho, X.X. Wang and H. Chan: General Study on Piezoelectric Transformer, *IEEE Transactions on Ultrasonics* Vol. 55 (2002), p. 216-220
- [2] R. Lerch: Simulation of Piezoelectric Devices by Two and Three Dimension Finite Element, *IEEE Transactions on Ultrasonics* Vol. 37 (1990), p. 233-247
- [3] J.S. Wang and D.F. Ostergaard: A Finite Element-Electric Circuit Coupled Simulation Method for Piezoelectric Transducer, *IEEE Transactions on Ultrasonics* Vol. 59 (1999), p. 1105-1108
- [4] G.R. Buchanan and J. Peddieson: Axsymmetric Vibration of Infinite Piezoelectric Cylinders Using One-Dimensional Finite Element, *IEEE Transactions on Ultrasonics* Vol. 36 (1989), p. 459-465
- [5] Z. Bai, Y. Zhao, W. Ma and T. Hao: Modal Analysis for Small Satellite System with Finite Element Method, *IEEE Transactions on Ultrasonics* Vol. 50 (2008), p. 788-792



ประวัติผู้เขียน

นายสมศักดิ์ วัชรคุปต์ เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา 2 เมื่อปีพ.ศ. 2548 ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาและสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ในปี พ.ศ. 2551 หลังจากสำเร็จ การศึกษาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการการแปลง พลังงานทางกลไฟฟ้า (2) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (3) ปฏิบัติการวงจร อิเล็กทรอนิกส์ (4) ปฏิบัติการระบบควบคุมและ (5) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทั้งนี้มีความ สนใจในด้านการวิเคราะห์ถึงความถี่ธรรมชาติ ศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของระบบรวมไปถึง การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานระบบไฟฟ้ากำลัง

ระหว่างศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่โดยมี ปรากฏดังภาคผนวก ข.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี